

Vorstellung eines Technikums zur datenunterstützten Assemblierung von Li-Ionen Rundzellen

Datenerhebung in der Batteriezellenproduktion

R. Ludwig, F. Schulz

Das Technikum des Zentrums für Digitalisierte Batteriezellenproduktion (ZDB) bietet ein realitätsnahes Produktionsumfeld im Labormaßstab. Durch die umfassende Erhebung von Anlagen-, Prozess- sowie Umgebungsdaten und deren Verknüpfung bietet es die Basis zur Entwicklung und Validierung neuer Fertigungsverfahren. Dabei können sowohl Digitalisierungsansätze als auch Konzepte auf Maschinen- oder Prozessebene adressiert werden. Dieser Beitrag legt das Augenmerk auf die Anlagen der Zellenassemblierung.

STICHWÖRTER

Batteriefertigung, Automatisierung, Digitalisierung

Pilot plant for data-supported assembly of lithium-ion round cells

The pilot plant at the Center for Digitalized Battery Cell Manufacturing (ZDB) offers a realistic production environment on laboratory scale. By comprehensively collecting and linking plant, process, and environmental data, it provides the basis for developing and validating new manufacturing processes. Both digitization approaches and concepts at machine or process level can be addressed. This paper focuses on cell assembly plants.

1 Einleitung

Elektrochemische Speicher nehmen eine zentrale Rolle ein in der aktuellen Transformation der Mobilität von fossilen Energieträgern hin zu elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. In diesem Zusammenhang hat sich die Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion) zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt [1]. Dabei trägt vor allem die Batteriezellherstellung erheblich zur Wertschöpfung bei. Bei einem Elektrofahrzeug ist die Rede von circa 40 % [2]. Vornehmlich im Bereich der Personen- und leichten Lastkraftwagen eingesetzt, finden Li-Ion auch in weiteren mobilen Anwendungen, wie etwa E-Bikes und Arbeitsmaschinen, sowie in der stationären Nutzung Verwendung.

Vor diesem Hintergrund wird jährlich ein weltweiter Zuwachs an benötigter Batteriekapazität von bis zu 6 TWh erwartet [3]. Aktuell sehen sich deutsche Hersteller einer überwältigenden Konkurrenz ausgesetzt. Mit mehr als 75 % Weltmarktanteil dominieren asiatische Hersteller, lediglich 7 % der Zellen kommen aus Europa [4]. Die daraus resultierende Abhängigkeit heimischer Automobilhersteller führt zu Bestrebungen, die Batteriezellenproduktion in Deutschland zu etablieren und zu stärken. So besagen Planungen, dass bis 2030 bis zu 30 % der weltweiten Zellen aus Europa, vorwiegend aus Deutschland, kommen sollen [5]. Ein zentrales Element ist dabei die Digitalisierung [6]. Um den entstehenden technischen Herausforderungen begegnen zu können, entstanden mit dem Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion (ZDB) am Fraunhofer IPA Labore und Technika, in denen Digitalisierungs- und Optimierungsansätze erforscht werden können [6].

2 Vom Pulver zur Batteriezelle: die Prozesskette in der Fertigung

Die Fertigung von Li-Ion-Batteriezellen besteht aus einer Abfolge unterschiedlicher Produktionsschritte. Diese lassen sich in drei Stadien einteilen: die Elektrodenfertigung, die Zellenassemblierung und das Zellfinish [7]. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die Prozesskette zur Fertigung einer Rundzelle gegeben.

2.1 Elektrodenfertigung

Ausgangspunkt sind die pulverförmig vorliegenden Rohmaterialien zur Anoden- beziehungsweise Kathodenherstellung. Diese werden zunächst trocken vermischt. Durch die Zugabe eines Lösungsmittels wird eine möglichst homogene Paste hergestellt, die je nach Elektrodenart auf ein Aluminium oder Kupferband aufgetragen wird. Durch eine erste Trocknung wird ein Großteil des Lösungsmittels entfernt, anschließend werden die Elektroden in einem Kalender verdichtet. Sobald die endgültige Schichtdicke eingestellt ist, werden die Elektroden auf Maß geschnitten. Bei der folgenden Endtrocknung werden die Restfeuchte und die Lösungsmittelreste ausgetrieben. Da bereits kleinste Verunreinigungen oder Schichtdickenschwankungen durch Fremdkörper ein Qualitätsrisiko darstellen, findet die Elektrodenfertigung in Reinräumen statt [7, 8].

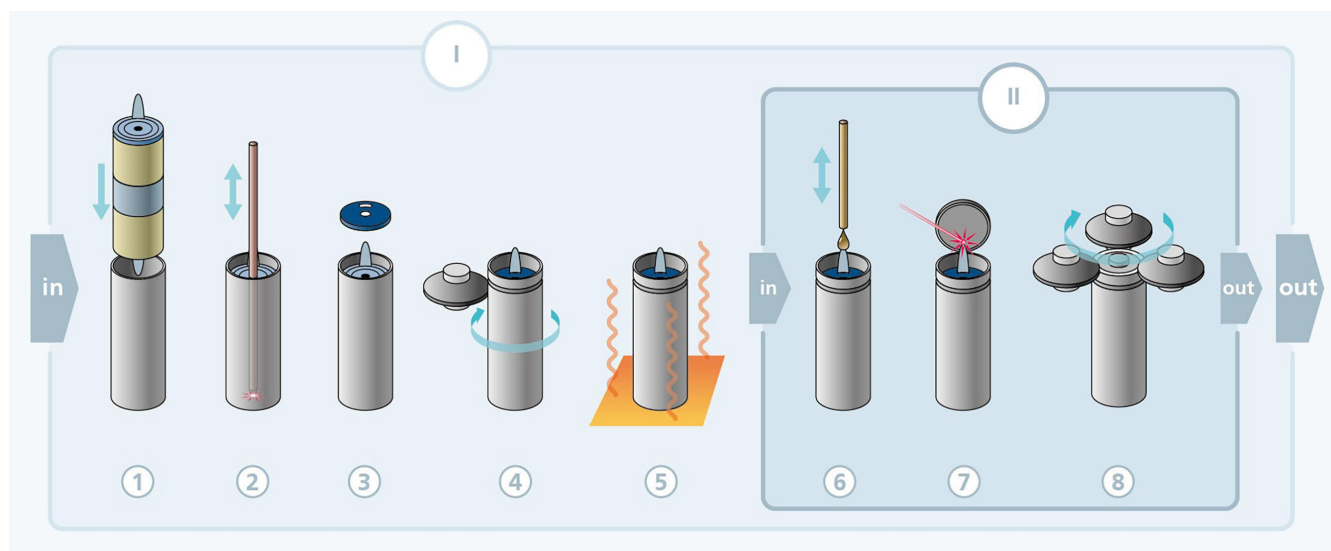


Bild 1. Prozesskette der Batteriezellassemblierung. Grafik: Fraunhofer IPA

2.2 Assemblierung

Der erste Schritt der Assemblierung einer Rundzelle ist die Herstellung des Elektrodenwickels. Dabei werden Anode und Kathoden, durch einen Separator getrennt, mit einem rotierenden Stab aufgewickelt bis der gewünschte Durchmesser erreicht ist. Nach dem Anschweißen der Ableiterplatten ist die Produktion des Wickels abgeschlossen. **Bild 1** zeigt die darauffolgenden Prozessschritte, die im ZDB-Technikum aufgebaut sind (I).

Zunächst wird der Wickel in das becherförmige Gehäuse gefügt (1) und durch Verschweißen des Anodenableiters fixiert (2). Auf der Kathodenseite wird ein isolierender Kunststoffring aufgebracht (3) und mit einer Sicke gesichert (4). Anschließend wird die Zelle ein weiteres Mal getrocknet (5), bevor sie in eine schutzgasgefüllte Glovebox (II) transferiert wird. Dort wird sie mit flüssigem Elektrolyt befüllt (6). Dabei ist darauf zu achten, dass das Elektrodenmaterial vollständig mit dem Elektrolyten getränkt ist. Ist der Befüllvorgang abgeschlossen wird der Deckel an den kathodenseitigen Ableiter angeschweißt und anschließend in die Zelle eingepasst (7). Schlussendlich wird der Becherrand umgebördelt und die Zelle so verschlossen (8). Die Zellassemblierung findet unter extrem trockenen Bedingungen statt, da der Elektrolyt in Verbindung mit Wasser hochgiftige Flusssäure bilden kann. Wie bei der Elektrodenfertigung sind die Prozesse der Assemblierung empfindlich gegen Verschmutzung, weswegen ebenfalls ein Reinraum nötig ist.

2.3 Zellfinish

Nach der Zellassemblierung erfolgt die Formierung. Dabei handelt es sich um eine Reihe von strom- und spannungsgeführten Lade- und Entladeprozessen, bei denen sich eine Schutzschicht ausbildet, die eine Zersetzung der Elektroden durch den Elektrolyten verhindert. Bei der anschließenden Zellreifung werden die Zellen über einen längeren Zeitraum gelagert und deren Eigenschaften überwacht. Dabei können fehlerhafte Zellen erkannt und aussortiert werden [7, 8].

3 Das ZDB-Technikum als Abbild der Zellassemblierung

Das hier vorgestellte Technikum umfasst vor allem die Anlagen und Prozessstationen der Zellassemblierung. Eine Ausnahme bildet die Herstellung der Wickel, diese werden als Halbzeuge eingebracht. Flankierende Prozesse der Stadien Elektrodenfertigung und Zellfinish, wie das Mischen der Elektrodenpaste oder die Zellformierung, sind in unmittelbarer räumlicher Nähe im Labormaßstab realisiert. Die Anlagen sind für zylindrische Batteriezellen des Typs 21700 ausgelegt. **Bild 2** zeigt die Aufteilung und die Prozessanlagen am Fraunhofer IPA.

Der Prozessreihenfolge entsprechend bezeichnet (A) eine automatisierte Fügestation. Sie umfasst einen Roboter zur Becher- und Wickelhandhabung, Kameraeinheiten und eine Mikroschweißanlage nach dem Prinzip des Widerstandsschweißen. Angelieferte Wickel und Becher werden durch den Roboter gefügt und der Verbund der Schweißanlage mittels einer Transferachse zugeführt. Nach der Schweißung legt der Roboter das Werkstück positionstreu in einem Werkstückträger ab. Die Station bedient somit die Positionen (1) und (2) aus Bild 1. Außerdem kann sie Aufgaben in der der Eingangs- und Qualitätskontrolle übernehmen. Ein Beispiel ist die Überprüfung eingebrachter Halbzeuge auf Maßhaltigkeit oder Beschädigungen. Im Zuge des Aufbaus des ZDB wurden an dieser Anlage bereits eine Analyse des Automatisierungsgrades erprobt [9] sowie Methoden zur datenbezogenen Prozessoptimierung und Prozessstabilisierung [10] getestet.

Die semimanuelle Sickenanlage (B) führt nach der Montage der Isolationsscheibe den Prozessschritt (4) durch. Sickenposition und Sickenform sind dabei individuell konfigurierbar. Die Maschine ist mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet und kann somit zusätzliche Daten über den Prozess aufnehmen und weitergeben.

Um der Gefahr einer Verschleppung von Feuchtigkeit, welche die Zellen beim Transport zum Technikum aufgenommen haben können, in die Glovebox (D) entgegenzuwirken, werden die Zellen in einem Vakuumofen (C) behandelt. Prozessparameter wie Zeit, Druck und Temperaturführung sind dabei einstellbar.

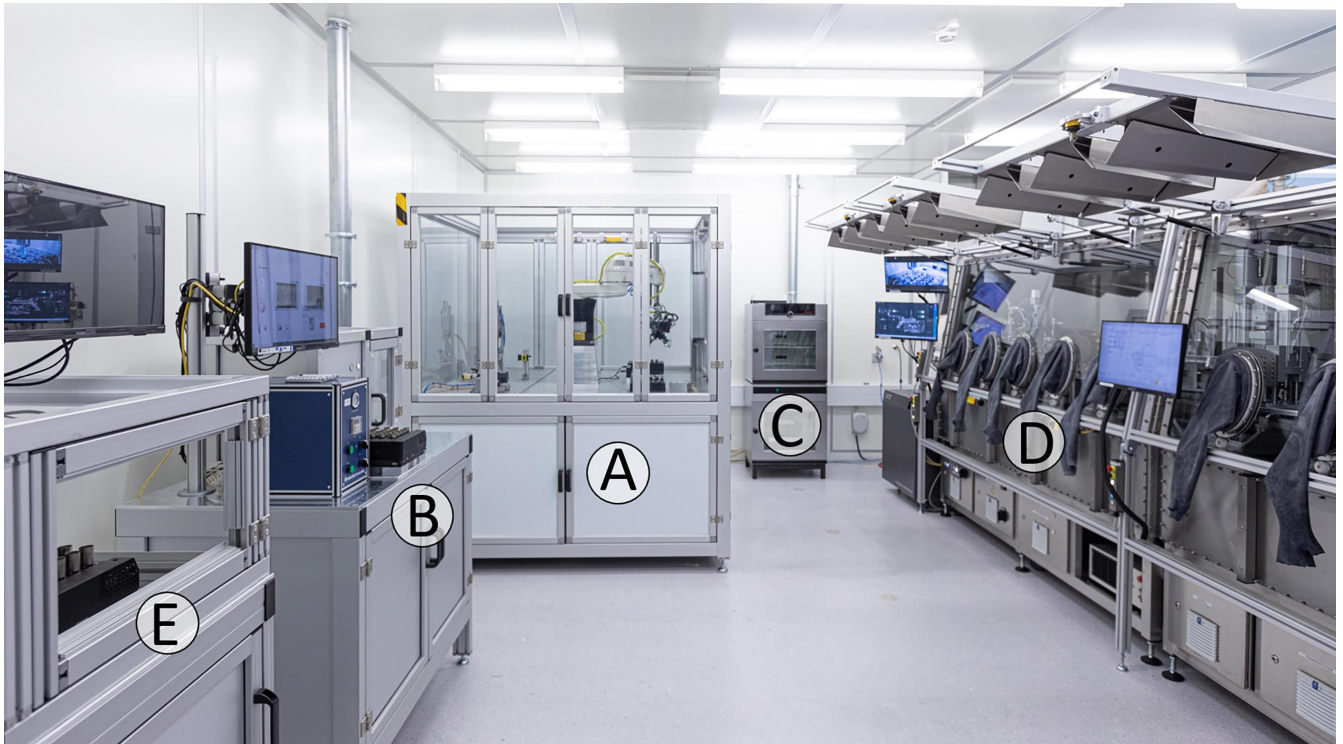


Bild 2. Anlagen des ZDB (Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion)-Technikums. Foto: Fraunhofer IPA/Rainer Bez

Für eine erhöhte Prozess- und Personensicherheit werden die anschließenden Prozessschritte unter einer Schutzgasatmosphäre durchgeführt. Dafür werden die Zellen in die Golvebox (D) eingeschleust. Diese ist mit Argon gefüllt, eventuell eingedrungenes Wasser und Sauerstoff können abgeschieden werden. Eine ständige Kontrolle von Temperatur und Atmosphäre führen zu einem stabilen Zustand innerhalb der Box. Ein integriertes, automatisiertes Transfersystem verbindet die Schritte Elektrolytbefüllung (6), Laserschweißen des Deckels an den Ableiter (7) und das Bördeln (8). Die prozessspezifischen Anlagen sind ebenfalls automatisiert und machen so ein menschliches Handeln innerhalb der Glovebox überflüssig. Sie verfügen über integrierte Sensorik für eine Vielfalt an Parametern, wie die gravimetrische und volumetrische Erfassung der Elektrolytmenge oder die aktuelle Bördelkraft, und bieten durch individuelle Einstellmöglichkeiten und Regelungen eine hohe Kontrolle über den Prozess. Die Wiegestation (E) ist mit hochfeinen und empfindlichen Gewichtssensoren ausgestattet und dient der erfolgs- beziehungsweise Qualitätskontrolle.

4 Die Prozessumgebung im Blick

Um den hohen Anforderungen der Zellherstellung an die Umgebung gerecht zu werden, wurde das Technikum in einem kombinierten Rein-/Trockenraum der ISO Klasse 6 errichtet, in dem Trockenraumbedingungen mit einem Taupunkt von bis zu -40°C erreicht werden können.

Um jederzeit über den Raumzustand informiert zu sein, wurde ein Monitoringsystem installiert, das neben Temperatur, Druck und Luftfeuchte beziehungsweise Taupunkt auch Daten über den Sauerstoffgehalt ermittelt. Partikelsensoren ermöglichen die punktuelle Überwachung des Raumes auf Kontamination durch luftgetragene Teilchen. Die Raumdaten können ähnlich wie die

Anlagen und Prozessdaten übermittelt und für Analysen verwendet werden. Sie bilden damit die Basis für Untersuchungen zum Einfluss der Umgebung oder Störungen auf das Produkt.

5 Datenbereitstellung als Fundament der Digitalisierung

Bei den Anlagen des Technikums kann zwischen interner und externer Kommunikation unterschieden werden. Unter intern ist die Kommunikation einzelner, anlageninterner Prozessstationen zu verstehen, die jeweils eine spezifische Steuerung besitzen und durch eine übergeordnete Steuerung orchestriert werden. Sie bildet damit eine klassische monolithische Steuerungskaskade. **Bild 3** zeigt beispielhaft die Anlage zum Wickelschweißen, in der sowohl das Robotersystem als auch die Mikroschweißanlage und die Linearachse über eigene Steuerungen verfügen und über verschiedene Bussysteme mit der Anlagen-SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) verbunden sind.

Im Gegensatz dazu wird hier unter externer Kommunikation die Möglichkeit verstanden, Daten anderen Anlagen und externen

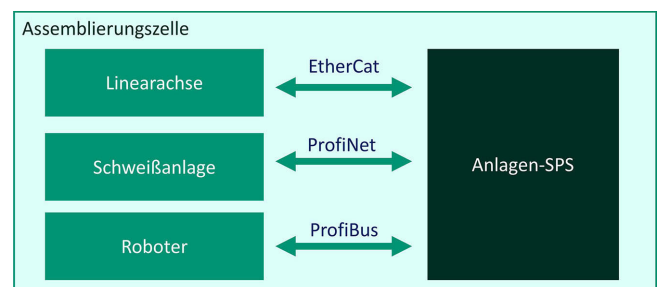


Bild 3. Datenfluss der internen Anlagenkommunikation. Grafik: Fraunhofer IPA

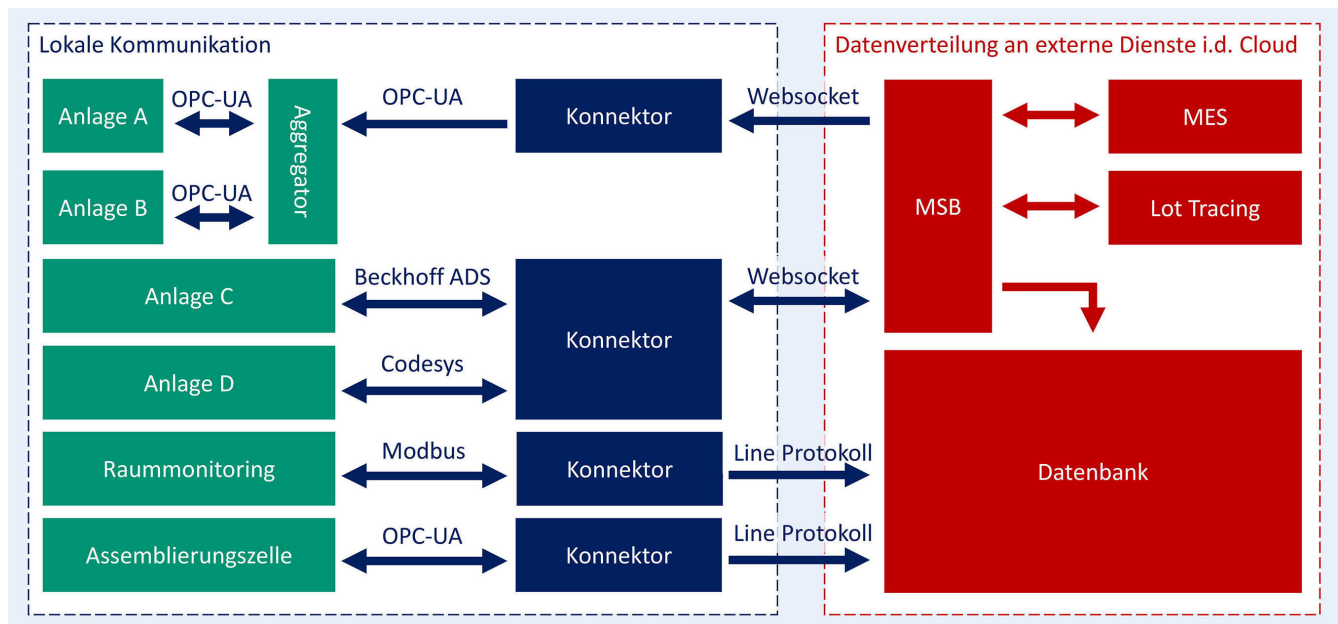


Bild 4. Datenfluss der externen Anlagenkommunikation. Grafik: Fraunhofer IPA

Services zur Verfügung zu stellen und somit eine anlagen- und standortübergreifende Vernetzung und Datenerhebung zu ermöglichen. Als Schnittstelle wird ein softwarebasierter, am Fraunhofer IPA entwickelter Datenkonnektor eingesetzt, der unabhängig vom Hersteller der Steuerung die Daten aus dieser ausliest und in eine zentrale, cloudbasierte Datenbank einspeist. Dies geschieht aktuell vornehmlich direkt oder durch den Einsatz des Manufacturing Service Bus (MSB), einer Middleware zur Integration verschiedener Datenquellen. Zudem können den produzierten Batteriezellen Kontextinformationen wie Auftragsnummer, Materialdaten und die Raumkonditionen in Form eines virtuellen Steckbriefs angehängt werden. Bild 4 zeigt schematisch den Datenfluss der externen Kommunikation. Es ist zu beachten, dass nicht nur die Anlagen des Technikums, sondern auch vor- und nachgelagerte Prozesse an die Cloud angebunden sind.

Aus diesem Datenpool heraus können Konzepte zur Produktnachverfolgung entwickelt, Analysen durchgeführt und Smart Services mit den benötigten Informationen versorgt werden. Am Beispiel der Visualisierung des Schweißprozesses wird das Vorgehen bei der Nutzung der Daten erläutert.

6 Die Visualisierung als Beispielanwendung

Für eine Visualisierung des Schweißprozesses ist es wichtig zu wissen, welches Ziel oder welche Ziele mit dieser Visualisierung erreicht werden sollen. Anhand dieser Ziele kann anschließend entschieden werden, auf welche visuellen Werkzeuge zurückgegriffen werden soll. Um geeignete Ziele für die Visualisierung zu finden, muss im Vorfeld geklärt werden, welches Problem beziehungsweise welche Aufgabe überhaupt gelöst werden soll. Als Beispiel sei hier die Situation genannt, dass der Verantwortliche des Schweißprozesses keine Kenntnis darüber hat, welche Änderungen am Prozess positive Einflüsse haben und welche sich neutral verhalten oder sogar einen negativen Effekt haben.

Eine Visualisierungslösung dient zwei wichtigen Zwecken: dem Informieren des Betrachters und der Befähigung eines Nutzers angemessen mit einem System interagieren zu können.

6.1 Informieren des Betrachters

Diesen Zweck verbinden viele primär mit dem Thema Visualisierung. Es geht dabei um die Aufgabe, Informationen in einer Art und Weise darzustellen, dass die Zielnutzer das benötigte Wissen möglichst effizient erhalten. Eine gute Visualisierung ist ein wichtiges Werkzeug, um etwa Entscheidungen fällen zu können und aus Daten zu lernen.

Die Informationen lassen sich entweder direkt wiedergeben oder nachdem diese eine Transformation durchlaufen haben. Zum Beispiel können Sensordaten aus einer Produktionsanlage direkt in einem Liniendiagramm angezeigt werden und damit die direkte Darstellung ermöglichen. Alternativ könnten Durchschnittswerte errechnet und in Form einer Zahl präsentiert werden, was die transformierte Variante darstellt.

Was den Informationsgehalt der Visualisierungslösung angeht, wirkt sich diese Entscheidung auf den Interpretationsspielraum des Betrachters aus. Bezogen auf das genannte Beispiel enthält das Liniendiagramm viele Informationen in Form der rohen Anlagendaten. Der Betrachter muss die Linien oder deren Verläufe beobachten und vergleichen, anschließend interpretieren und Rückschlüsse ziehen. Bei guter Prozesskenntnis kann dies durchaus von Vorteil sein, bedeutet für den Betrachter jedoch immer einen höheren Aufwand, als bei der Präsentation nur weniger Kennzahlen. Aus letzteren kann der Betrachter einfacher Konsequenzen ableiten, allerdings gehen bei der Transformation meist Informationen verloren. Schneller könnten die Kennzahlen verarbeitet werden, wenn zusätzlich mit Farben gearbeitet wird, also die Zahlen rot dargestellt werden, wenn die Zahl schlecht ist und grün, wenn diese gut ist. Dies wäre die Vorstufe zu einer einfachen Ampel, bei welcher der Betrachter nur sehen kann, ob eine Zahl gut oder schlecht ist. Die Informationen, wie gut oder schlecht der Wert tatsächlich ist, zum Beispiel wie weit die Zahl von einem Grenzwert entfernt ist, geht verloren. Allerdings ist diese Art der Darstellung intuitiv noch leichter zu erfassen und setzt beim Betrachter weniger Prozesswissen voraus.

Als nächstes spielt die geplante Platzierung der Visualisierung eine Rolle. Soll die Visualisierung als Dashboard in Form eines großen Monitors in der Produktionshalle stehen, dann ist es ratsam, dass die wichtigen Informationen in wenigen Augenblicken unmissverständlich übermittelt werden. Bei Verwendung einer AR-Brille, wie in **Bild 5** gezeigt, können hingegen komplexere Informationen dargeboten werden.

Um eine Visualisierung so effizient wie möglich aufzubauen, ist es wichtig, dass für jedes Visualisierungselement genau definiert ist, welcher Nutzen verfolgt wird. Ist eine solche Definition nicht möglich oder nicht zufriedenstellend, sollte sich gegen das entsprechende Visualisierungselement entschieden werden.

Zuletzt ist es wichtig zu bestimmen, wann eine Visualisierung betrachtet wird. Es gibt zwei Extreme: Auf der einen Seite steht eine Visualisierung, die solange betrachtet wird, bis etwas von Bedeutung geschieht. Auf der anderen Seite wird eine Visualisierung nur dann betrachtet, wenn eine Benachrichtigung beispielsweise per E-Mail kommt. In der Regel liegt die richtige Entscheidung zwischen diesen beiden Extremen, aber allgemein betrachtet gibt es hier kein richtig oder falsch.

6.2 Befähigung zur Bedienung

Eine Visualisierung soll in der Regel nicht nur Informationen anzeigen und Wissen vermitteln, sondern auch die Möglichkeit geben, angemessen abstrahierte Interaktionen mit anderen Systemen, wie zum Beispiel mit Datenbanken oder MES Systemen, durchzuführen. Eine Interaktion besteht dabei aus einer abstrahierten Schnittstelle zu einem anderen System. Diese Abstraktion kann je nach Bedarf unterschiedlich komplex definiert werden. Die Komplexität hängt von der Zielperson ab, welche die Visualisierung einsetzen soll. Ein Experte benötigt gegebenenfalls mehr Einstellmöglichkeiten in einer Interaktion als ein Laie, der beispielsweise nur auf einen „Start“-Knopf drücken will. Beispiele für Interaktionslösungen wären etwa:

- Lesen, Speichern und Löschen von einer Entität in einer Datenbank
- Auslesen von Daten aus einer Datenquelle
- Schreiben von Daten in eine Datenquelle
- Anbieten von einem Formular mit Werteüberprüfungen
- Setzen von Anlagenparametern
- Handgeführtes Steuern von Achsen

7 Ausblick

Mit der Verbindung von Batteriezellenproduktion und Digitalisierungsmaßnahmen adressiert das ZDB zwei bedeutende Themenbereiche. Neben den erwähnten Arbeiten zur Ermittlung des Automatisierungsgrades und der anlagenübergreifenden Prozessanalyse sowie der beispielhaft gewählten Visualisierung erlauben die Anlagen des Technikums eine Vielzahl weiterer Anwendungen. Im Bereich der Digitalisierung bieten sie eine Plattform zur Evaluation neuer Smart Services. Die während der Produktion prototypischer Zellen erhobenen Daten können als Basis für KI-Modelle verwendet werden, die wiederum zu einem verbesserten Produktverständnis führen können. Hieraus lassen sich beispielsweise Methoden zur Qualitätskontrolle ableiten.

Auch eine Entwicklung von cloudbasierten Steuerungskonzepten ist denkbar. Hiermit in Verbindung steht die Entwicklung und das Testen von Analysetools bei standortübergreifender Ver-



Bild 5. Visualisierung via AR (Augmented Reality)-Brille: Einblendung des 3D-Modells als komplexe Information. Foto: Fraunhofer IPA/Rainer Bez

netzung. Eine Anlagenoptimierung kann nicht nur im Hinblick auf den Prozess stattfinden, sondern auch Verschleißfestigkeit und Wartungsfreundlichkeit in trockener und reiner Umgebung fokussieren.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Thesen zur industriellen Batteriezellfertigung in Deutschland und Europa. Stand: 2018. Internet: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/thesen-zur-industriellen-batteriezellfertigung-in-deutschland-und-europa.pdf?__blob=publicationFile&v=5. Zugriff am 09.03.2023
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.): Batterien für die Mobilität von morgen. Internet: www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/batteriezellfertigung.html. Zugriff am 09.03.2023
- [3] Thielmann, A.; Wietschel, M.; Funke, S. et. al.: Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Karlsruhe: Fraunhofer ISI 2020
- [4] Frieske, B.; Stieler, S.: Die Produktionskette „Batteriesystem“ und kritische Ressourcen. Themenpapier Cluster Elektromobilität Süd-West. Stand: 2022. Internet: www.transformationswissen-bw.de/fileadmin/media/Publikationen/e-mobil_Studien/Themenpapier_Cluster_ESW_Produktionskette_Batteriesystem_und_kritische_Ressourcen.pdf. Zugriff am 09.03.2023
- [5] DE e.V. (Hrsg.): Batteriezellfertigung für die Elektromobilität in Deutschland. VDE Positionspapier. Stand: 2019. Internet: <https://www.vde.com/resource/blob/1876056/bf663ae459e3be4cf57ea6994767b973/positions-papier-batteriezellfertigung-in-deutschland-data.pdf>. Zugriff am 09.03.2023
- [6] Landesregierung Baden-Württemberg: Land fördert Ausbau des Zentrums für Digitalisierte Batteriezellenproduktion. Stand: 20.05.2022. Internet: www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-foerdert-ausbau-des-zentrums-fuer-digitalisierte-batteriezellenproduktion. Zugriff am 09.03.2023
- [7] PEM RWTH Aachen, VDMA (Hrsg.): Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle. Stand: 2018. Internet: www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaaoqixv. Zugriff am 09.03.2023
- [8] Karabelli, D.; Oberle, M.: Overview of the Battery Manufacturing Process. In: Birke, K. P.; Weeber, M.; Oberle, M. (Hrsg.): Handbook on Smart Battery Cell Manufacturing. München: World Scientific 2022, pp. 3–31
- [9] Henke, A.; Defranceski, M.: Automatisierungsgrad im digitalen Zeitalter. *wt Werkstattstechnik online* 111 (2021) 10, S. 763–769. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [10] Mayer, P.; Oberle, M.; Gärtner, S.: Cross-Process Stabilization and Optimization of Battery Cell Production Through Digital Networking of Process Stations. In: Birke, K. P.; Weeber, M.; Oberle, M. (Hrsg.): Handbook on Smart Battery Cell Manufacturing. München: World Scientific 2022, pp. 275–300



Dipl.-Ing. **Ragnar Lodwig**

Foto: Autor

Fabian Schulz, B.Sc.

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1390
ragnar.lodwig@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)